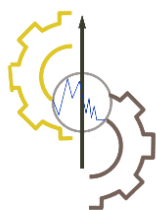
E-ISSN: 2717-4581 | P-ISSN: 2783-1345



Innovation Management and Operational Strategies

www.journal-imos.ir

Inov. Manage. Oper. Stra. Vol. 5, No. 1 (2024) 79–92.





Paper Type: Original Article

Operational Strategies to the Mechanical Performance Assessment of Concrete with the Neural Network and Artificial Intelligence

Hadi Faghihmaleki[1],*, Mehdi Ghadiri[1]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Ayandegan Institute of Higher Education, Tonkabon, Iran; h.faghihmaleki@gmail.com.

Citation:



Faghihmaleki, H., & Ghadiri, M. (2024). Operational strategies to the mechanical performance assessmen t of concrete with the neural network and artificial intelligence, *5*(1), 79-92.

Received: 20/11/2023 Reviewed: 23/12/2023 Revised: 28/01/2024 Accepted: 06/04/2024

Abstract

Purpose: This study was conducted to predicte the resistance properties of concrete with different types of neural networks. The studied data was collected from the database of 127 mixing plans. The input data included the age of concrete in day, the amount of coarse grain, fine grain, cement, water and concrete plasticizer. The target data included compressive strength.

Methodology: In this research, an attempt has been made to make models for different projects by statistical study of laboratory samples of concrete in order to have a suitable prediction for estimating the resistance properties of concrete. The use of artificial intelligence as a modern method has a special place in engineering sciences. In this research, the data used were first normalized and then the desired data were trained using the Lorenberg Marquardt algorithm.

Findings: The evaluation criteria of artificial neural network models were obtained using evaluation and error and the results showed that the use of 10 hidden layers had the highest correlation coefficient and the lowest error. The structure of this network was multi-layered perceptron.

Originality/Value: The results showed that for the constructed neural network, the value of correlation coefficient, mean root, error square and mean absolute error of the artificial neural network were 0.94 and 1.9, respectively.

Keywords: Mechanical performance of concrete, Artificial neural network, Lunberg marquardt algorithm, Concrete quality control.

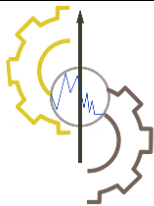


Corresponding Author: h.faghihmaleki@gmail.co



10.22105/imos.2024.453210.1346







مدیریت نوآوری و راهبردهای عملیاتی

دوره ۵، شماره (۱)، (۱۴۰۳)، ۷۹-۹۲

www.journal-imos.ir



نوع مقاله: پژوهشی

راهبردهای عملیاتی جهت بررسی عملکرد مکانیکی بتن به کمک شبکه عصبی و هوش مصنوعی

هادی فقیه‌ملکی[۱،*]، مهدی غدیری[۱]

[۱]گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آیندگان، تنکابن، ایران.

چکیده

هدف: این مطالعه با هدف بررسی پیش‌بینی خواص مقاومتی بتن به کمک انواع مختلف شبکه‌های عصبی انجام گرفت. داده‌های موردمطالعه در این پژوهش از بانک اطلاعاتی ۱۲۷ طرح اختلاط جمع‌آوری شده است. داده‌های ورودی شامل سن بتن برحسب روز، میزان درشت‌دانه، ریزدانه، سیمان، آب، روان‌کننده برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است و داده‌های هدف شامل مقاومت فشاری بوده است.

روش‌شناسی پژوهش: در این پژوهش سعی شده بامطالعه آماری نمونه‌های آزمایشگاهی بتن جهت پروژه‌های گوناگون مدل‌هایی ساخته شود تا بتواند پیش‌بینی مناسبی جهت تخمین خواص مقاومتی بتن داشته باشد. استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان یک روش مدرن جایگاه ویژه‌ای در علوم مهندسی دارد. در این پژوهش داده‌های مورداستفاده ابتدا نرمال‌سازی شدند و سپس داده‌های موردنظر با استفاده از الگوریتم لورنبرگ مارکوارت مورد آزمایش قرار گرفت.

یافته‌ها: معیارهای ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از ارزیابی و خطا به‌دست آمد و نتایج نشان داد استفاده از ۱۰ لایه مخفی دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا بوده است. ساختار این شبکه به‌صورت پرسپترون چندلایه بوده است.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: نتایج نشان داد برای شبکه عصبی ساخته‌شده مقدار ضریب همبستگی، ریشه میانگین، مربعات خطا و میانگین خطای مطلق شبکه عصبی مصنوعی ساخته‌شده به ترتیب برابر است با ۰/۹۴، ۱/۹ بوده است.

کلیدواژه‌ها: عملکرد مکانیکی بتن، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم لورنبرگ مارکوار، کنترل کیفیت بتن.

۱- مقدمه

کنترل کیفیت بتن، با توجه به اهمیتی که کیفیت آن از نظر مقاومت و پایایی در سازه‌های بتنی و بتن‌آرمه دارد، یکی از مهم‌ترین برنامه‌هایی است که در کنترل کیفیت عمومی سازه به آن پرداخته می‌شود. در انتخاب نسبت‌های اختلاط بتن، عمدتا کارایی و روانی بتن، مقاومت در برابر شرایط محیطی ویژه و سازگاری با ضوابط آزمایش مقاومت فشاری مدنظر قرار می‌گیرند. خواص مقاومتی بتن از مهم‌ترین و مرسوم‌ترین پارامترهای بتن است که کارایی و کیفیت آن را تعیین می‌کند [1].

روش‌های آزمایشگاهی تعیین خواص مقاومتی بتن نسبتا پیچیده، وقت‌گیر و مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه‌های مجهز و حساس است. از طرف دیگر نتایج وابستگی شدیدی به عوامل خارجی مثل خطاهای انسانی، ابعاد نمونه، نحوه بارگذاری و ... دارد. برای حل این مشکل و گریز از روش مستقیم، همواره مهندسان سعی کرده‌اند به‌وسیله روابط تجربی و دستگاه‌های مختلف، روش کوتاه و غیرمستقیم و درعین‌حال دقیق، برای پیش‌بینی و تخمین این مهم پیدا کنند. یکی از روش‌های مرسوم، سریع و نسبتا دقیق، تعیین خواص مقاومتی بتن به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی است [2].

روش‌های مدل‌سازی سنتی به‌منظور تخمین و پیش‌بینی خواص بتن بر پایه محدودی از اعداد و پارامترها بودند که به‌وسیله رگرسیون‌گیری خطی یا چند متغیره به دست می‌آید. اگر داده‌های جدید تا اندازه‌ای با داده‌های اولیه متفاوت باشند، نه‌تنها متغیرها، بلکه لازم است شکل روابط نیز تغییر کند؛ اما در مقایسه، شبکه عصبی لازم نیست که در رابطه با شکل و فرم خاص باشد، در عوض لازم است داده‌های ورودی و خروجی کافی در اختیار باشد. توانایی و کارایی شبکه‌های عصبی با رگرسیون‌های خطی و نمایی و حتی چند متغیره مقایسه شده است. این مقایسه‌ها ثابت کرد که شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک رهیافت هوشمند در مقابل روش‌های رگرسیونی چند متغیره است [3]. این در حالی است که روش‌های رگرسیونی کارایی خوبی داشته و در بسیاری از تحقیقات استفاده شده و یا در حال استفاده است. یکی از امتیازات رهیافت شبکه‌های عصبی، تخمین کارایی و ارتباط متغیرهای ورودی مختلف با هم دیگر است، یعنی برخلاف آنالیز رگرسیونی، در شبکه‌های عصبی مصنوعی لازم نیست از قبل دانسته شود که بین متغیرها ارتباطی وجود دارد یا خیر، درواقع شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور هوشمند و با استفاده از الگوریتم‌های آموزش، ارتباطی بین متغیرهای ورودی را پیدا می‌کند [4]. سیف‌الهی و همکارانش [5] در پژوهشی به مدل‌سازی رفتار سدهای بتنی با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون لجستیک پرداختند. هدف این پژوهش ایجاد یک روش ترکیبی از رگرسیون لجستکی با بهینه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات با مقدار حقیقی جهت پیش‌بینی رفتار تجهیزات سد می‌باشد. در این مطالعه از داده‌های ۳۶۵ روز، از ۱۳۹۷/۰۱/۳۱ تا ۱۳۹۸/۰۱/۳۱ که ۶۰۰ مجموعه داده تجهیزات سد شامل پارامترهای دمای آب، سطح آب، فشار دریچه، میزان رسوب‌گذاری، فشار منافذ، دمای هوا، حجم آب ورودی، مشخصات ویژه سد، شرایط بتن، سطح آب مخزن، تغییر مکان افقی و عمودی، اجزای اتصال انتقالی و شتاب زمین، قدرت، فشار، کشش و تنش بالا برای مدل‌سازی استفاده شدند. برای آموزش مدل‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات مقدار حقیقی-رگرسیون لجستیک و ۱۲۰ مجموعه داده جهت آزمایش استفاده گردید. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از چهار آماره شامل ضریب تعیین (*R2*)، ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، ضریب پراکندگی (*SI*) و میانگین خطاهای انحرافی (*MBE*) استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل در پیش‌بینی فشار پیزومتریک در بدنه سد عملکرد قابل قبولی دارد.

روشنی و همکارانش [6] در پژوهشی به این منظور ترکیب‌های مناسبی از نمونه‌های بتن نفوذپذیر با دانه‌بندی و نسبت‌های آب به سیمان متفاوت به تعداد ۳۶ نمونه ساختند و مورد آزمایش قراردادند. نسبت آب به سیمان جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی در محدوده ۰/۲۸ تا ۰/۳۴ در ترکیب با سنگ‌دانه‌های با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی‌متر، ۱۲/۵ میلی‌متر و ۱۹/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. به‌منظور انتخاب مدل مناسب پیش‌بینی تغییرات نفوذپذیری مقایسه بین تکنیک‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی صورت دادند. با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از فعالیت آزمایشگاهی و بررسی برازش مدل‌ها، مدل بهینه پیشنهاد شده است. مقایسه مدل‌ها نشان داد که رگرسیون خطی در پیش‌بینی تغییرات نفوذپذیری بتن نفوذپذیر نتایج نزدیک‌تری را تولید کرده است. وجود ضرایب ۵۴٫۵ و ۵۲٫۵ و ۴۱٫۵ برای اندازه سنگدانه‌ها نسبت به ضرایب ثابت حدود نصف اعداد ذکرشده نشان‌دهنده تاثیر بیشتر این عامل بر نفوذپذیری است. ژی و همکارانش [7] در پژوهشی نشان دادند که بتن *CO2* می‌تواند قابل‌اعتماد در نظر گرفته شود؛ زیرا مقاومت فشاری آن را می‌توان با تحلیل رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌دقت پیش‌بینی کرد. شبکه عصبی مصنوعی ایجادشده برای این مقاله امکان پیش‌بینی دقیق مقاومت فشاری بتن *CO2* را فراهم می‌کند. شبکه عصبی مصنوعی یک رابطه قوی با نمونه‌های آزمایشی نشان داد و *R* مضربی ۰٫۹۸ و *R* مربع ۰٫۹۵ را نشان داد. شبکه عصبی مصنوعی نیز توسط ۲۲ مخلوط بتن تایید آزمایشگاهی شد. شبکه عصبی مصنوعی میانگین خطای ۱/۲۴ مگاپاسکال یا ۳/۴۳% را در مخلوط‌های اعتبارسنجی نشان می‌دهد که ۵۹% نمونه‌های بتن با خطای ۳% و ۷۷% با خطای ۵% هستند. پیش‌بینی موفقیت‌آمیز مقاومت فشاری بتن *CO2* می‌تواند به استفاده بیشتر از مواد سبز کمک کند.

احمد و همکارانش [8] در پژوهشی از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (*ANN*) برای ساخت یک مدل محصور کردن مستقیما از داده‌های تجربی برای پیش‌بینی اجزای مختلف پاسخ تنش-کرنش استفاده کردند. یک پایگاه داده آزمایشی متشکل از ۲۲۶ آزمایش فشار محوری بر روی نمونه‌های بتن محدودشده با *LRS FRP* استفاده کردند. نتایج آزمون، ازنظر پاسخ تنش-کرنش کامل محدود، استحکام، کرنش، کرنش گسیختگی *FRP* و پاسخ اتساع موردبررسی قرار گرفت. عبارات پیش‌بینی‌کننده و مدل‌های عملی *ANN* برای استحکام، کرنش و شکل پاسخ تنش-کرنش محوری ارایه‌شده‌اند. مدل‌های موجود برای بتن محدود *LRS FRP* نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل‌های موجود و پیشنهادی نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی به نتایج بهتری دست می‌یابند. شریعتی و همکارانش [9] در پژوهشی با هدف بررسی پتانسیل استفاده از یک مدل *ANN* برای پیش‌بینی مقاومت فشاری (*CS*) و مقاومت الکتریکی (*ER*) بتن زئولیتی طبیعی (*NZC*) پرداختند. نتایج تجربی ۳۲۴ نمونه *NZC* ساخته‌شده از ۵۴ طرح مخلوط مختلف برای توسعه مدل *ANN* استفاده کردند. هفت ورودی متغیر هنگام طراحی مدل *ANN* برای پیش‌بینی مقادیر *CS* و *ER* ازجمله سن نمونه، نسبت آب به مواد سیمانی، سیمان، *NZ*، شن، ماسه و محتوای فوق روان‌کننده در نظر گرفته گرفتند. یافته‌های این مطالعه

پتانسیل کمک به کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان را با استفاده از یک تکنیک پیش‌بینی قابل‌اعتماد به‌جای انجام آزمایش‌های پرهزینه و وقت‌گیر دارد.

در این پژوهش سعی شده است با مطالعه آماری نمونه‌های آزمایشگاهی بتن جهت پروژه‌های گوناگون مدل‌هایی ساخته شود تا بتواند پیش‌بینی مناسبی جهت تخمین خواص مقاومتی بتن داشته باشد. همچنین داده‌های مورداستفاده ابتدا نرمال‌سازی شدند و سپس داده‌های موردنظر با استفاده از الگوریتم لورنبرگ مارکوارت مورد آزمایش قرار گرفت که این موضوع در کارهای گذشته مورداستفاده قرار نگرفته بود.

۲- روش‌شناسی پژوهش

۲-۱- ساخت بانک اطلاعاتی

بانک اطلاعاتی گسترده و قابل‌اعتماد پیش‌شرط لازم برای عملکرد موفق هر شبکه عصبی مصنوعی است [10]. در این پژوهش، از بانک اطلاعاتی ۱۲۷ طرح اختلاط گزارش‌شده توسط مراجع معتبر [11–13] مطابق **جدول ۱** استفاده‌شده است.

جدول ۱- داده‌های مورداستفاده جهت ساخت مدل.

Table 1- Data used to build the model.

شماره	سن بتن	ماسه (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)	خاکستر بادی (کیلوگرم)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
1	28	633.75	1154	165	168	135	14.78
2	7	789	1098	300	165	0	25
3	28	755	1107	250	150.5	100	41.24
4	7	755	1107	250	150.5	100	32.16
5	7	800	1114	375	135	0	19.4
6	28	751.8	1154.9	380	133	0	48
7	180	633.75	1235	165	168	135	29.56
8	28	821	1144	350	122.5	0	43
9	28	867	1185.56	335	113.9	0	41.2
10	28	633.75	1134	255	162	45	44.31
11	90	807	1185	250	123	50	50.18
12	1	585	1287	400	160	0	11.85
13	180	633.75	1198	255	162	45	46.67
14	7	690.5	1332	370	111	0	26.23
15	28	682.5	1187	110	170	90	9.5
16	7	889.27	1215	300	106	0	29.17
17	180	585	1176	220	176	180	25.08
18	28	585	1093	280	168	120	39.65
19	1	633.75	1076	255	162	45	5.53
20	180	682.5	1123	170	166	30	23.89
21	3	633.75	1165	255	162	45	16.39
22	7	867	1185	335	113.9	0	34
23	180	841	1235	150	105	100	39.03
24	180	585	1176	340	164	60	64.37
25	7	812	1131	350	126	0	26
26	28	800	1114	375	135	0	35.1

جدول ۱-ادامه.

Table 1- Continuation.

شماره	سن بتن	ماسه (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)	خاکستر بادی (کیلوگرم)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

27	7	793.1	1218	320	112	0	32.85
28	7	807	1185	250	123	50	31.07
29	28	682.5	1187	200	164	0	18.06
30	28	1062.79	1051	300	105	0	37.07
31	28	756.2	1175	350	129.5	0	42.4
32	28	1036.2	1024	335	113.9	0	39
33	1	585	394.875	220	176	180	6.26
34	90	755	1107	250	150.5	100	55.09
35	7	841	1235	150	105	100	17.44
36	1	633.75	427.781	210	165	90	4.08
37	3	585	394.875	340	164	60	22.73
38	28	793.1	1218.2	320	112	0	43.35
39	28	821	1144	325	130	0	44
40	28	585	394.875	340	164	60	57.24
41	28	421	1144	350	122.5	0	43.2
42	7	1036.2	1024.8	335	113.9	0	32.44
43	7	795.2	1221.5	392.3	145.1	0	33.2
44	3	682.5	460.688	200	164	0	7.99
45	7	821	1144	350	122.5	0	33.4
46	28	682.5	460.688	170	166	30	20.71
47	28	633.75	724.781	300	159	0	41.53
48	7	735.3	1129.5	307.7	113.8	0	28.1
49	28	736.2	1130.9	380	148.2	0	42.7
50	1	682.5	460.688	200	164	0	3.14
51	28	851	1248	200	100	50	3397
52	180	633.75	427.781	300	159	0	48.64
53	180	633.75	427.781	210	165	90	35.39
54	3	585	394.875	220	176	180	10.86
55	28	861	1263	250	97.5	0	33.95
56	28	585	394.875	250	176	180	22.14
57	180	861	1263	250	97.5	0	53.09
58	180	682.5	460.688	110	170	90	15.66
59	28	481	1235	150	105	100	30.43
60	1	585	394.875	280	168	120	6.67
61	90	841	1235	150	105	100	37.18
62	1	633.75	427.781	165	168	135	3.48
63	28	830	1157	350	115.8	0	48.5
64	7	823	1209	100	115	150	14.16
65	1	682.5	460.688	170	166	30	2.04
66	7	1062.79	1051.1	300	105	0	30.25
67	28	633.75	427.781	210	165	90	34.94
68	7	765.2	1175.5	350	129.5	0	30.55
69	90	823	1209	100	115	150	34.94
70	180	682.5	460.688	200	164	0	18.91

جدول ۱-ادامه.

Table 1- Continuation.

شماره	سن بتن	ماسه (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)	خاکستر بادی (کیلوگرم)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
71	1	682.5	460.688	140	168	60	2.1
72	28	823	1209	100	115	150	26.72
73	3	682.5	460.688	110	170	90	2.98
74	28	812	1131	350	126	0	37
75	28	811	1130	350	133	0	38.2
76	7	751.8	1154.9	380	133	0	34.1
77	28	755.2	1160.1	350	139.3	0	35.95
78	180	585	394.875	400	160	0	58.48
79	7	581	1248	200	100	50	24.15
80	1	585	394.875	340	164	60	9.65
81	28	775.7	1191.5	350	119.3	0	44.8
82	28	735.3	1129.5	307.7	113.8	0	39.8
83	180	807	1185	250	123	50	54
84	7	811	1130	350	133	0	21.9
85	90	861	1263	250	97.5	0	49.09
86	3	585	394.875	400	160	0	27.58
87	1	682.5	460.688	110	170	90	1.5
88	7	755.2	1160.1	350	139.3	0	28.4
89	28	889.27	1215.98	300	105	0	37.97
90	3	585	394.875	280	168	120	17.12
91	7	421	1144	350	122.5	0	29.13
92	28	1015.45	1004.3	370	122.1	0	41.87
93	7	821	1144	325	130	0	33
94	180	585	394.875	280	168	120	55.3
95	28	780	1198	320	124.8	0	35
96	7	775.7	1191.5	350	119.3	0	36.7
97	28	807	1185	250	123	50	39.29
98	90	695	1020	250	188	150	58.73
99	3	682.5	460.688	140	168	60	4.06
100	28	795.2	1221.5	392.3	145.1	0	44.7
101	180	755	1107	250	150.5	100	58.45
102	7	717.68	1384.57	280	109.2	0	26.03
103	3	633.75	427.781	165	168	135	6.91
104	7	967.85	1346.31	335	113.9	0	30.93
105	3	633.75	427.781	210	165	90	10.9
106	7	861	1263	250	97.5	0	28.64
107	1	633.75	427.781	300	159	0	7.61
108	28	695	1020	250	188	150	44.59
109	7	830	1157	350	115.8	0	42.5
110	7	780	1198	320	124.8	0	24.2
111	90	851	1248	200	100	50	42.95
112	28	690.5	1332.13	370	111	0	34.64

جدول ۱-ادامه.

Table 1- Continuation.

شماره	سن بتن	ماسه (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)	خاکستر بادی (کیلوگرم)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
113	28	845.55	1156.2	370	122.1	0	42.4
114	28	789	1098	300	165	0	31
115	7	736.2	1130.9	380	148.2	0	36.45
116	28	682.5	460.688	140	168	60	14.56
117	28	585	394.875	400	160	0	55.32
118	180	851	1248	200	100	50	46.13
119	3	682.5	460.688	170	166	30	8.14
120	3	633.75	427.781	300	159	0	19.36
121	7	845.55	1156.2	370	122.1	0	34.53
122	28	717.68	1384.57	280	109.2	0	30.23
123	7	695	1020	250	188	150	34.47
124	7	1015.45	1004.3	370	122.1	0	33.73
125	28	697.85	1346.31	335	113.9	0	36.72
126	180	823	1209	100	115	150	35.61
127	180	682.5	460.688	140	168	60	18.62
128	180	695	1020	250	188	150	61.55

در پژوهش حاضر از روش شبکه عصبی مصنوعی، مقاومت فشاری نمونه استاندارد بتن مدل‌سازی و عملکرد آن‌ها با کمک معیارهای متداول ارزیابی عملکرد، موردبررسی قرارگرفته است. مقادیر مقاومت فشاری نمونه بتن به‌صورت تابعی از شاخص بار نقطه‌ای، قطر، نمونه طول نمونه اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه با کمک الگوریتم‌های هوشمند *ANN* پیش‌بینی‌شده است و درنهایت با کمک. داده‌های آموزش، صحت سنجی و آزمون مورداستفاده درروش پیشنهادی تحقیق شامل ۱۲۷ نمونه از نتیجه مقاومت فشاری با روش بار نقطه‌ای بوده است.

$$X_{normal} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}. \qquad (۱)$$

روش پیشنهادی تحقیق با کمک نرم‌افزار *Matlab Ra* ورژن ۲۰۱۸، تحلیل شبکه عصبی و *ANN* بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌های محققان انجام شد و مقدار مقاومت فشاری بتن پیش‌بینی گردید. در این مطالعه به‌منظور برآورد مقاومت فشاری از مدل شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون با روش بهینه‌سازی لونبرگ مارکوارت استفاده شد و بهترین ساختار شبکه با استفاده از شاخص آماری خطای میانگین مربعات (*MSE*) انتخاب گردید. الگوریتم لونبرگ مارکوارت، اغلب سریع‌ترین الگوریتم پس انتشار خطا می‌باشد.

بردارهای ورودی و خروجی شبکه توسط الگوریتم لونبرگ مارکوارت به‌طور تصادفی به داده‌های آموزش، صحت سنجی و آزمون تقسیم‌شده‌اند که درصد اختصاص‌یافته به بخش آموزش صحت سنجی و آزمون در مدل بهینه در این مطالعه به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵% است که ۹۰ داده برای آموزش و ۱۹ داده برای صحت سنجی و ۱۹ داده برای آزمون به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده است. البته شایان توجه است که باید قبل از بسط شبکه عصبی، تمام داده‌ها برای یکسان‌سازی ارزش داده‌ها نرمال‌سازی شوند. در این پژوهش با استفاده از **رابطه (۱)** داده‌ها نرمال‌سازی شدند [14].

در **رابطه (۱)**، X مقادیر واقعی متغیر، X_{mx} مقدار بیشینه X_{min} مقدار کمینه در داده‌ها و X_{norm} مقادیر نرمال شده هستند. **جدول ۲** نرمال‌سازی داده‌های مورداستفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۲-نرمال‌سازی داده‌های مورداستفاده.

Table 2- Normalization of the used data.

شماره	سن	ماسه	شن	سیمان	آب	خاکستر بادی	مقاومت فشاری
1	0.150838	0.596308	0.308214	0.4125	0.893617	0.75	0.004351
2	0.03352	0.742386	0.792802	0.75	0.87766	0	0.007359
3	0.150838	0.710394	0.799309	0.625	0.800532	0.555556	0.01214
4	0.03352	0.710394	0.799309	0.625	0.800532	0.555556	0.009467
5	0.03352	0.752736	0.80437	0.9375	0.718085	0	0.005711
6	0.150838	0.707383	0.833942	0.95	0.707447	0	0.01413
7	1	0.596308	0.308214	0.4125	0.893617	0.75	0.008702
8	0.150838	0.772495	0.826061	0.875	0.651596	0	0.012658
9	0.150838	0.815777	0.85611	0.8375	0.605851	0	0.012128
10	0.150838	0.596308	0.308214	0.6375	0.861702	0.25	0.013044
11	0.497207	0.759322	0.855705	0.625	0.654255	0.277778	0.014772
12	0	0.550438	0.284422	1	0.851064	0	0.003488
13	1	0.596308	0.308214	0.6375	0.861702	0.25	0.013739
14	0.03352	0.649705	0.962084	0.925	0.590426	0	0.007722
15	0.150838	0.642178	0.332006	0.275	0.904255	0.5	0.002797
16	0.03352	0.836732	0.878105	0.75	0.56383	0	0.008587
17	1	0.550438	0.284422	0.55	0.93617	1	0.007383
18	0.150838	0.550438	0.284422	0.7	0.893617	0.666667	0.011672
19	0	0.596308	0.308214	0.6375	0.861702	0.25	0.001628
20	1	0.642178	0.332006	0.425	0.882979	0.166667	0.007033
21	0.011173	0.596308	0.308214	0.6375	0.861702	0.25	0.004825
22	0.03352	0.815777	0.85611	0.8375	0.605851	0	0.010009
23	1	0.791313	0.891857	0.375	0.558511	0.555556	0.01149
24	1	0.550438	0.284422	0.85	0.87234	0.333333	0.018949
25	0.03352	0.764027	0.816661	0.875	0.670213	0	0.007654
26	0.150838	0.752736	0.80437	0.9375	0.718085	0	0.010333
27	0.03352	0.746243	0.87971	0.8	0.595745	0	0.00967
28	0.03352	0.759322	0.855705	0.625	0.654255	0.277778	0.009146
29	0.150838	0.642178	0.332006	0.5	0.87234	0	0.005316
30	0.150838	1	0.758891	0.75	0.558511	0	0.010913
31	0.150838	0.711523	0.848836	0.875	0.68883	0	0.012482
32	0.150838	0.974981	0.739876	0.8375	0.605851	0	0.011481
33	0	0.550438	0.284422	0.55	0.93617	1	0.001843
34	0.497207	0.710394	0.799309	0.625	0.800532	0.555556	0.016217
35	0.03352	0.791313	0.891857	0.375	0.558511	0.555556	0.005134
36	0	0.596308	0.308214	0.525	0.87766	0.5	0.001201
37	0.011173	0.550438	0.284422	0.85	0.87234	0.333333	0.006691
38	0.150838	0.746243	0.87971	0.8	0.595745	0	0.012761
39	0.150838	0.772495	0.826061	0.8125	0.691489	0	0.012953
40	0.150838	0.550438	0.284422	0.85	0.87234	0.333333	0.01685
41	0.150838	0.396127	0.826061	0.875	0.651596	0	0.012717
42	0.03352	0.974981	0.739876	0.8375	0.605851	0	0.00955
43	0.03352	0.748219	0.882096	0.98075	0.771809	0	0.009773
44	0.011173	0.642178	0.332006	0.5	0.87234	0	0.002352
45	0.03352	0.772495	0.826061	0.875	0.651596	0	0.009832
46	0.150838	0.642178	0.332006	0.425	0.882979	0.166667	0.006097

جدول ۲-ادامه.

Table 2- Continuation.

شماره	سن	ماسه	شن	سیمان	آب	خاکستر بادی	مقاومت فشاری
47	0.150838	0.596308	0.522953	0.75	0.845745	0	0.012225
48	0.03352	0.691858	0.815577	0.76925	0.605319	0	0.008272
49	0.150838	0.692705	0.816589	0.95	0.788298	0	0.01257
50	0	0.642178	0.332006	0.5	0.87234	0	0.000924
51	0.150838	0.800723	0.901256	0.5	0.531915	0.277778	1
52	1	0.596308	0.308214	0.75	0.845745	0	0.014319
53	1	0.596308	0.308214	0.525	0.87766	0.5	0.010418
54	0.011173	0.550438	0.284422	0.55	0.93617	1	0.003197
55	0.150838	0.810132	0.912101	0.625	0.518617	0	0.009994
56	0.150838	0.550438	0.284422	0.625	0.93617	1	0.006518
57	1	0.810132	0.912101	0.625	0.518617	0	0.015628
58	1	0.642178	0.332006	0.275	0.904255	0.5	0.00461
59	0.150838	0.452582	0.891857	0.375	0.558511	0.555556	0.008958
60	0	0.550438	0.284422	0.7	0.893617	0.666667	0.001963
61	0.497207	0.791313	0.891857	0.375	0.558511	0.555556	0.010945
62	0	0.596308	0.308214	0.4125	0.893617	0.75	0.001024
63	0.150838	0.780963	0.83546	0.875	0.615957	0	0.014277
64	0.03352	0.774377	0.873058	0.25	0.611702	0.833333	0.004168
65	0	0.642178	0.332006	0.425	0.882979	0.166667	0.000601
66	0.03352	1	0.758891	0.75	0.558511	0	0.008905
67	0.150838	0.596308	0.308214	0.525	0.87766	0.5	0.010286
68	0.03352	0.719992	0.848836	0.875	0.68883	0	0.008993
69	0.497207	0.774377	0.873058	0.25	0.611702	0.833333	0.010286
70	1	0.642178	0.332006	0.5	0.87234	0	0.005567
71	0	0.642178	0.332006	0.35	0.893617	0.333333	0.000618
72	0.150838	0.774377	0.873058	0.25	0.611702	0.833333	0.007866
73	0.011173	0.642178	0.332006	0.275	0.904255	0.5	0.000877
74	0.150838	0.764027	0.816661	0.875	0.670213	0	0.010892
75	0.150838	0.763086	0.815938	0.875	0.707447	0	0.011245
76	0.03352	0.707383	0.833942	0.95	0.707447	0	0.010038
77	0.150838	0.710583	0.837702	0.875	0.740957	0	0.010583
78	1	0.550438	0.284422	1	0.851064	0	0.017215
79	0.03352	0.546674	0.901256	0.5	0.531915	0.277778	0.007109
80	0	0.550438	0.284422	0.85	0.87234	0.333333	0.002841
81	0.150838	0.729871	0.860405	0.875	0.634574	0	0.013188
82	0.150838	0.691858	0.815577	0.76925	0.605319	0	0.011716
83	1	0.759322	0.855705	0.625	0.654255	0.277778	0.015896
84	0.03352	0.763086	0.815938	0.875	0.707447	0	0.006447
85	0.497207	0.810132	0.912101	0.625	0.518617	0	0.014451
86	0.011173	0.550438	0.284422	1	0.851064	0	0.008119
87	0	0.642178	0.332006	0.275	0.904255	0.5	0.000442
88	0.03352	0.710583	0.837702	0.875	0.740957	0	0.00836
89	0.150838	0.836732	0.878105	0.75	0.558511	0	0.011178
90	0.011173	0.550438	0.284422	0.7	0.893617	0.666667	0.00504
91	0.03352	0.396127	0.826061	0.875	0.651596	0	0.008575
92	0.150838	0.955457	0.725054	0.925	0.649468	0	0.012326

جدول ۲-ادامه.

Table 2- Continuation.

شماره	سن	ماسه	شن	سیمان	آب	خاکستر بادی	مقاومت فشاری
93	0.03352	0.772495	0.826061	0.8125	0.691489	0	0.009714
94	1	0.550438	0.284422	0.7	0.893617	0.666667	0.016279
95	0.150838	0.733917	0.865104	0.8	0.66383	0	0.010303
96	0.03352	0.729871	0.860405	0.875	0.634574	0	0.010804
97	0.150838	0.759322	0.855705	0.625	0.654255	0.277778	0.011566
98	0.497207	0.653939	0.736405	0.625	1	0.833333	0.017289
99	0.011173	0.642178	0.332006	0.35	0.893617	0.333333	0.001195
100	0.150838	0.748219	0.882096	0.98075	0.771809	0	0.013159
101	1	0.710394	0.799309	0.625	0.800532	0.555556	0.017206
102	0.03352	0.675279	1	0.7	0.580851	0	0.007663
103	0.011173	0.596308	0.308214	0.4125	0.893617	0.75	0.002034
104	0.03352	0.910669	0.972337	0.8375	0.605851	0	0.009105
105	0.011173	0.596308	0.308214	0.525	0.87766	0.5	0.003209
106	0.03352	0.810132	0.912101	0.625	0.518617	0	0.008431
107	0	0.596308	0.308214	0.75	0.845745	0	0.00224
108	0.150838	0.653939	0.736405	0.625	1	0.833333	0.013126
109	0.03352	0.780963	0.83546	0.875	0.615957	0	0.012511
110	0.03352	0.733917	0.865104	0.8	0.66383	0	0.007124
111	0.497207	0.800723	0.901256	0.5	0.531915	0.277778	0.012644
112	0.150838	0.649705	0.962084	0.925	0.590426	0	0.010197
113	0.150838	0.795595	0.834882	0.925	0.649468	0	0.012482
114	0.150838	0.742386	0.792802	0.75	0.87766	0	0.009126
115	0.03352	0.692705	0.816589	0.95	0.788298	0	0.01073
116	0.150838	0.642178	0.332006	0.35	0.893617	0.333333	0.004286
117	0.150838	0.550438	0.284422	1	0.851064	0	0.016285
118	1	0.800723	0.901256	0.5	0.531915	0.277778	0.01358
119	0.011173	0.642178	0.332006	0.425	0.882979	0.166667	0.002396
120	0.011173	0.596308	0.308214	0.75	0.845745	0	0.005699
121	0.03352	0.795595	0.834882	0.925	0.649468	0	0.010165
122	0.150838	0.675279	1	0.7	0.580851	0	0.008899
123	0.03352	0.653939	0.736405	0.625	1	0.833333	0.010147
124	0.03352	0.955457	0.725054	0.925	0.649468	0	0.009929
125	0.150838	0.656621	0.972337	0.8375	0.605851	0	0.01081
126	1	0.774377	0.873058	0.25	0.611702	0.833333	0.010483
127	1	0.642178	0.332006	0.35	0.893617	0.333333	0.005481
128	1	0.653939	0.736405	0.625	1	0.833333	0.018119

۲-۲- بررسی داده‌ها

داده‌های مورداستفاده در این پژوهش شامل سن بتن، میزان درشت‌دانه، ریزدانه، سیمان، آب، روان کننده به‌عنوان داده‌های ورودی و مقاومت فشاری به‌عنوان داده‌های تارگت در نظر گرفته شد. خصوصیات آماری داده‌ای مورداستفاده مطابق **جدول ۳** می‌باشد.

جدول ۳-خصوصیات آماری داده‌های مورداستفاده.
Table 3- Statistical characteristics of the used data.

نام متغیر	تعداد	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	میانگین	انحراف استاندارد
سن بتن (روز)	128	180	1	43.66	60.528
درشت‌دانه kg/m	128	1063	421	736.04	121.695
ریزدانه (kg/m)	128	1385	395	895.19	366.199
سیمان kg/m	128	400	100	271.72	84.160
آب (kg/m)	128	180	98	140.15	26.286
روان کننده kg/m	128	180	0	44.06	55.903
مقاومت فشاری (MPA)	128	3397	0	57.29	297.895

۳- معماری شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم لورنبرگ

از مهم‌ترین عوامل در افزایش دقت یک شبکه عصبی انتخاب معماری بهینه آن است که این امر با تنظیم پارامترها صورت می‌گیرد. تعیین تعداد لایه بهینه و تعداد نرون در لایه پنهان که با روش آزمون و خطا به دست می‌آید، عملکرد شبکه ساخته‌شده را تا حد زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد. معیار متوقف کردن آموزش در شبکه‌های عصبی، میانگین مربعات خطا (MSE) (**رابطه (۲)**) است که متوسط مجذور اختلاف میان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل (خروجی شبکه) و مقدار واقعی (تارگت) می‌باشد و هرچقدر مقدار MSE کوچک‌تر باشد به معنای عملکرد بهتر شبکه است [15].

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2. \qquad (۲)$$

در **رابطه (۲)**، n تعداد پیش‌بینی‌ها و e خطای پیش‌بینی است که از تفاوت مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی به دست می‌آید.

مقدار R (**رابطه (۳)**) بیانگر مقدار و شدت ارتباط و وابستگی بین خروجی شبکه (y) و هدف (y') است. درواقع این ارتباط نزدیک‌بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است. دو معیار R و MSE به‌عنوان پایه‌ای برای انتخاب شبکه بهینه است [16].

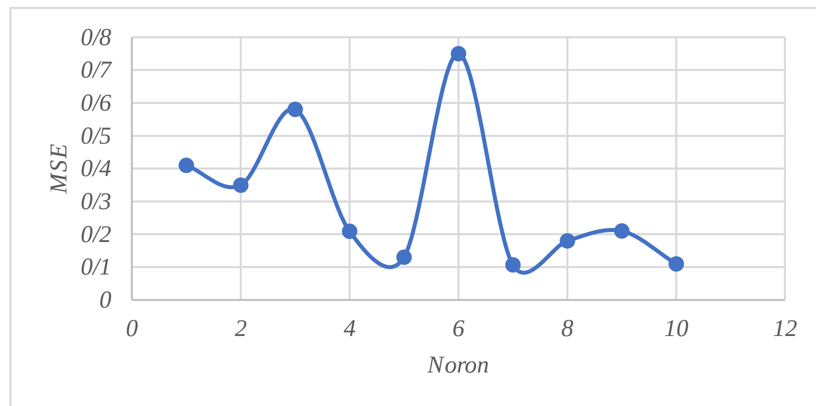
$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - y')^2}{\sum y'^2}}. \qquad (۳)$$

مقادیر متوسط و میانگین مربعات خطا برای ۱۰ بار آزمایش شبکه با n نورون در لایه پنهان مطابق **جدول ۴** به‌دست‌آمده است.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در مرحله آزمایش.
Table 4- Evaluation criteria of artificial neural network models in the test phase.

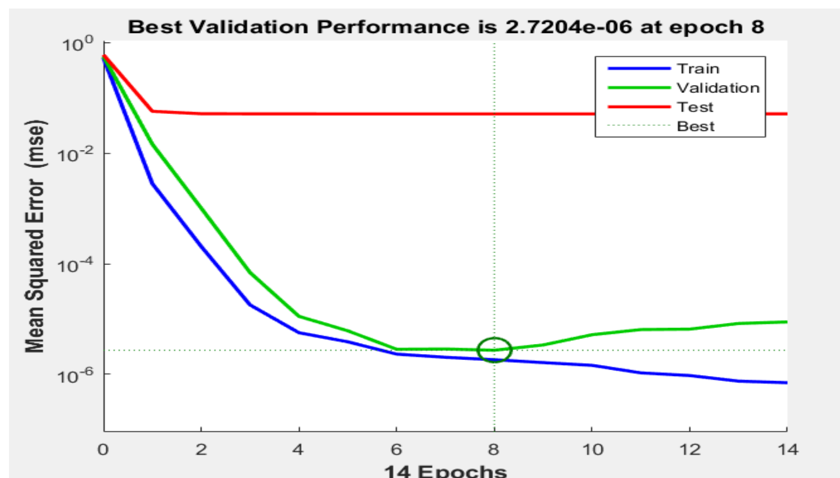
نام مدل	R	MSE
ann1	0.15	0.41
ann2	0.36	0.35
ann3	0.47	0.58
ann4	0.25	0.209
ann5	0.24	0.13
ann6	0.84	0.75
ann7	0.45	0.107
ann8	0.39	0.18
ann9	0.11	0.21
ann10	0.94	0.019

همان‌طور که از **جدول ۴** قابل استنباط است حالتی که ۱۰ عصب در لایه پنهان وجود داشته باشد بهترین نتیجه را در برداشته است، یعنی دارای کمترین خطا و بیشترین ضریب همبستگی است. پس مدل *ann*۱۰ بهترین مدل شبکه عصبی می‌باشد. **شکل ۱**، مقایسه مقدار خطابه ازای تعداد مختلف لایه‌های پنهان را نشان می‌دهد. همچنین **شکل ۲**، روند تغییرات تابع بهینه خطا برای شبکه بهینه را نشان می‌دهد.



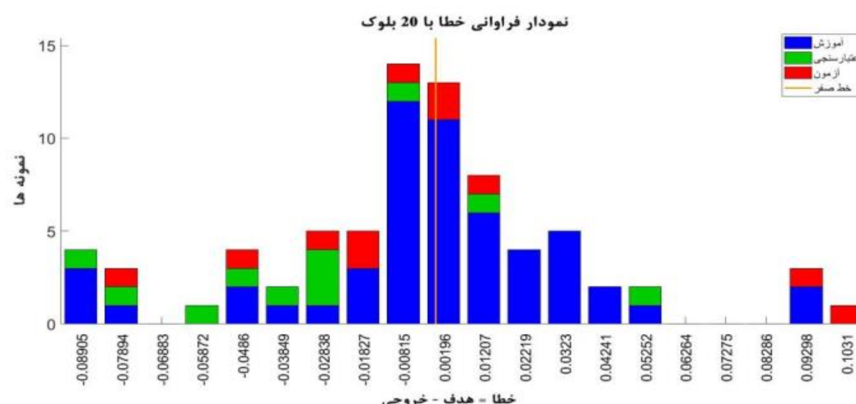
شکل ۱- مقایسه مقدار خطابه ازای تعداد مختلف لایه‌های پنهان.

Figure 1- Comparison of speech value for different number of hidden layers.



شکل ۲- روند تغییرات تابع بهینه خطا برای شبکه بهینه.

Figure 2- The trend of changes in the optimal error function for the optimal network.

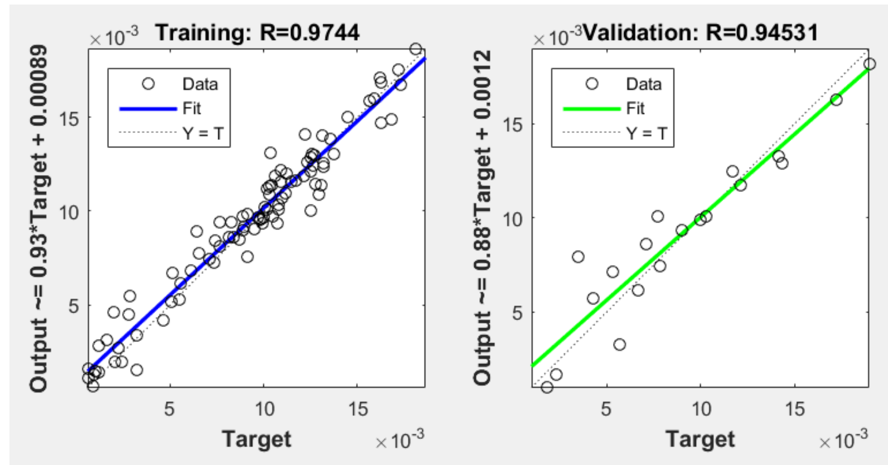


شکل ۳- نمودار فراوانی خطای داده‌های آموزش، داده‌های اعتبار سنجی و داده‌های آزمون.

Figure 3- Error frequency diagram of training data, validation data and test data.

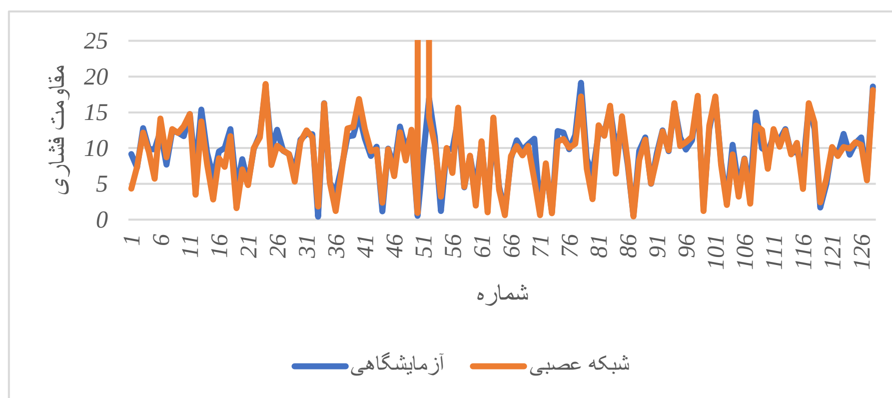
شکل ۳ تصویر هیستوگرام فراوانی خطای داده‌ها را در شبکه عصبی نشان می‌دهد. هرچقدر نمودار هیستوگرام به توزیع نرمال نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر روش مورداستفاده است. ارتباط نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی توسط مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش،

صحت سنجی و آزمون در **شکل ۴** ارایه شده است. در نهایت، **شکل ۵**، مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی ساخته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-مقایسه مقادیر حقیقی مقاومت فشاری بتن با مدل ساخته‌شده برای داده‌های آموزش و اعتبار سنجی.

Figure 4-Comparison of the actual values of concrete compressive strength with the built model for training and validation data.



شکل ۵- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی ساخته‌شده.

Figure 5- Comparison of experimental and predicted values by the constructed neural network.

خلاصه و مشخصات پارامترهای شبکه عصبی به‌کاررفته در این فصل مطابق **جدول ۵** می‌باشد.

جدول ۵-خلاصه و مشخصات و پارامترهای شبکه عصبی به‌کاررفته.

Table 5-Summary and specifications and parameters of the neural network used.

پارامتر	توضیحات
ساختار شبکه عصبی	پرسپتون چندلایه (MLP)
نوع شبکه عصبی	پیشرو
الگوریتم آموزشی	لورنبرگ مارکوآت
تابع عملکرد خطا	MSE
الگوریتم خطایابی	انتشار برگشتی
تعداد لایه پنهان	1
تعداد نرون‌های پنهان در لایه پنهان	10
تابع تحریک لایه میانی	تانژانت سگموييد
تابع تحریک لایه خروجی	خطی

۴- بحث بر روی نتایج

این مطالعه باهدف بررسی پیش‌بینی خواص مقاومتی بتن به کمک انواع مختلف شبکه‌های عصبی انجام گرفت. داده‌های موردمطالعه در این پژوهش از بانک اطلاعاتی ۱۲۷ طرح اختلاط جمع‌آوری‌شده است. داده‌های ورودی شامل سن بتن برحسب روز، میزان درشت‌دانه، ریزدانه، سیمان، آب، روان‌کننده برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است و داده‌های هدف شامل مقاومت فشاری بوده است جمع‌آوری شده است. استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان یک روش مدرن جایگاه ویژه‌ای در علوم مهندسی دارد. در این پژوهش داده‌های مورداستفاده ابتدا نرمال‌سازی شدند و سپس داده‌های موردنظر با استفاده از الگوریتم لورنبرگ مارکوارت مورد آموزش قرار گرفت. معیارهای ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از ارزیابی و خطا به‌دست آمد و نتایج نشان داد استفاده از ۱۰ لایه مخفی دارای بیشترین برای ضریب همبستگی و کمترین خطای *MSE* بوده است. ساختار این شبکه به‌صورت پرسپترون چندلایه بوده است. نتایج نشان داد برای شبکه عصبی ساخته‌شده مقدار ضریب همبستگی، ریشه میانگین، مربعات خطا و میانگین خطای مطلق شبکه عصبی مصنوعی ساخته‌شده به ترتیب برابر است با ۰/۹۴، ۱/۹ بوده است.

احمد و همکارانش [8] نشان دادند از میان شبکه‌ها با تعداد نرون های مختلف، شبکه‌ای به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید که دارای بهترین مقادیر ضریب همبستگی حاصل از داده‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش بوده و همچنین کمترین مقدار میانگین مربعات خطاها (*MSE*) را داشته باشد که در این مطالعه، شبکه با تعداد ۶ عدد نورون بهترین نتایج پیش‌بینی را ارایه کرد. شریعتی و همکارانش [9] مدل جنگل تصادفی، نسبت به مدل‌های تحلیلی، بهبود پیش‌بینی قابل‌ملاحظه در تعیین مولفه‌های زوال داشته است. پیزارو و همکارانش [11] نشان دادند شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق به‌خوبی توانست مقادیر مقاومت فشاری استوانه‌ای نمونه‌های بتنی را پیش‌بینی کند. با استفاده از نتایج شبکه عصبی، مقادیر بهینه استفاده از پوزولان‌های موردنظر در این تحقیق به‌منظور دستیابی به بیشینه مقاومت فشاری تعیین گردید. همودی و همکارانش [16] نشان دادند که مدل در پیش‌بینی فشار پیزومتریک در بدنه سد عملکرد قابل قبولی دارد. همچنین نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی با کسب R۲=۰/۹۳ و SI۸/۵۸۷ همگرایی قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به داده‌های آموزش مدل نیز بیانگر این است که میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) مدل ارایه‌شده، برای داده‌های آموزش به ترتیب برابر با ۱/۳۴۱ و ۱/۵۲۶ می‌باشد و برای داده‌های صحت‌سنجی این مقادیر برابر با ۱/۵۷۶ و ۲/۲۴۷ می‌باشد که این نشان از عملکرد خوب مدل پیشنهادشده دارد.

۵- نتیجه گیری

نتایج زیر برگرفته از کار انجام شده است:

۱. مقایسه مدل *ANN* با خروجی آزمایشگاهی برای کلیه داده‌ها نشان می‌دهد که توان رابطه بسیار نزدیکی میان خروجی مدل *ANN* با مقادیر آزمایشگاهی دارد.
۲. محاسبه درصد خطای نسبی بین مقادیر خروجی پیش‌بینی شبکه عصبی برای مجموعه داده‌ها در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد به علت کم بودن مقدار درصد خطای نسبی، مدل‌سازی انجام‌شده توسط شبکه عصبی از دقت خوبی برخوردار بوده است.
۳. مدل شبکه عصبی ساخته‌شده دارای ضریب همبستگی ۰/۹۷ و ۰/۹۴ در داده‌های آزمایش و اعتبار سنجی بوده است که نشان‌دهنده دقت مناسب شبکه عصبی ساخته‌شده است.

منابع

[1] Faghihmaleki, H., & Rastkar, H. (2024). Investigation of the effect of polyvinyle alcohol fibers on mechanical properties of the high-strength concrete containing microsilica. *Sigma journal of engineering and natural sciences*, *42*(1), 153–163.

[2] Faghihmaleki, H., & Nazari, H. (2023). Laboratory study of metakaolin and microsilica effect on the performance of high-strength concrete containing Forta fibers. *Advances in bridge engineering*, *4*(1), 11. https://doi.org/10.1186/s43251-023-00091-4

[3] Li, S., Liew, J. Y. R., & Xiong, M. X. (2021). Prediction of fire resistance of concrete encased steel composite columns using artificial neural network. *Engineering structures*, *245*, 112877. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621010270

[4] Qian, F., Yabin, L., & Gangbing, S. (2019). Real-Time monitoring of early-age concrete strength using piezoceramic-based smart aggregates. *Journal of aerospace engineering*, *32*(1), 4018115. https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000939

[5] Seifollahi, M., Abbasi, S., Fahimi Farzam, M., & Daneshfaraz, R. (2023). Crack detection in concrete structures using convolutional neural network. *Mdrsjrns*, *23*(5), 21-34. (**In Persian**). http://mcej.modares.ac.ir/article-16-54192-en.html

[6] Roshni, M. M., & Kargar, S. H. (2021). Laboratory evaluation of mechanical properties of concrete containing microsilica, iron-blast furnace slag and rice husk ash and its development using artificial neural network method. *Structural engineering and construction*, *9*(7), 183-204. (**In Persian**). https://elmnet.ir/doc/2580785-88187?elm_num=1

[7] Xi, X., Yin, Z., Yang, S., & Li, C.-Q. (2021). Using artificial neural network to predict the fracture properties of the interfacial transition zone of concrete at the meso-scale. *Engineering fracture mechanics*, *242*, 107488. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794420310493

[8] Ahmad, A., Chaiyasarn, K., Farooq, F., Ahmad, W., Suparp, S., & Aslam, F. (2021). Compressive strength prediction via gene expression programming (GEP) and artificial neural network (ANN) for concrete containing RCA. *Buildings*, *11*(8). https://www.mdpi.com/2075-5309/11/8/324

[9] Shariati, M., Mafipour, M. S., Mehrabi, P., Ahmadi, M., Wakil, K., Trung, N. T., & Toghroli, A. (2020). Prediction of concrete strength in presence of furnace slag and fly ash using Hybrid Artificial Neural Network-Genetic Algorithm (ANN-GA). *Smart structures and systems, an international journal*, *25*(2), 183–195. https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE10697841

[10] Nguyen, H., Vu, T., Vo, T. P., & Thai, H. T. (2021). Efficient machine learning models for prediction of concrete strengths. *Construction and building materials*, *266*, 120950. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182032955X

[11] Pizarro, P. N., & Massone, L. M. (2021). Structural design of reinforced concrete buildings based on deep neural networks. *Engineering structures*, *241*, 112377. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621005277

[12] Tran, V. L., Thai, D. K., & Nguyen, D. D. (2020). Practical artificial neural network tool for predicting the axial compression capacity of circular concrete-filled steel tube columns with ultra-high-strength concrete. *Thin-walled structures*, *151*, 106720. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823119314867

[13] Ramkumar, K. B., Kannan Rajkumar, P. R., Noor Ahmmad, S., & Jegan, M. (2020). A Review on performance of self-compacting concrete – use of mineral admixtures and steel fibres with artificial neural network application. *Construction and building materials*, *261*, 120215. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820322200

[14] Ly, H. B., Nguyen, T. A., Thi Mai, H. V., & Tran, V. Q. (2021). Development of deep neural network model to predict the compressive strength of rubber concrete. *Construction and building materials*, *301*, 124081. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821018419

[15] Lyngdoh, G. A., Zaki, M., Krishnan, N. M. A., & Das, S. (2022). Prediction of concrete strengths enabled by missing data imputation and interpretable machine learning. *Cement and concrete composites*, *128*, 104414. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946522000105

[16] Hammoudi, A., Moussaceb, K., Belebchouche, C., & Dahmoune, F. (2019). Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, *209*, 425–436. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819305975